

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra automatizační techniky a řízení

Testování baterií elektromobilů

The Electric Vehicle Batteries Testing

Student: Michal Hostaša
Vedoucí práce: Ing. Jiří Kulhánek, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Hostaša**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3902R001 Aplikovaná informatika a řízení
Specializace: 70 Aplikovaná informatika a řízení
Téma: **Testování baterií elektromobilů**
The Electric Vehicle Batteries Testing

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled technologií a parametrů baterií používaných v současné době pro pohon elektromobilů, hybridních automobilů a elektrobusů.
2. Navrhněte laboratorní test životnosti baterie, který bude určen k ověření parametrů udávaných výrobcem (pokles kapacity v závislosti na nabíjecích cyklech).
3. Navrhněte a realizujte test baterie, umožňující změření její aktuální kapacity.
4. Navrhněte test baterie, umožňující zrychlenou laboratorní simulaci skutečného jízdního zatížení baterie v elektromobilu při městském provozu.
5. Navrhněte a realizujte test baterie pro teploty -20°C až $+40^{\circ}\text{C}$ s hodnocením vlastností baterie (vnitřní odpor, maximální proud, kapacita).

Seznam doporučené odborné literatury:

Pistoia, G. *Electric and hybrid vehicles*, 2010, Elsevier B.V., 645s., ISBN 978-0-444-53565-8.
Electropedia, *Battery testing*, 2011, Online: <http://www.mpoweruk.com/testing.htm>
Jurgen, R. K. *Electric and Hybrid-Electric Vehicles – Batteries*, 2011, SAE International, 15s., ISBN: 978-0-7680-5718-8
SAE J2288 *Life Cycle Testing of Electric Vehicle Battery Modules*, 1997, SAE, 5s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kulháněk, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011
Datum odevzdání: 21.05.2012



prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. května 2012

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21. května 2012

.....
podpis

Michal Hostaša
Zahradní 219
75356 Opatovice

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HOSTAŠA, M. *Testování baterií elektromobilu*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení, 2012, 38 s. Vedoucí práce: Kulhánek, J.

Bakalářská práce se zabývá testováním baterií a jejich použitelností v elektromobilech. V úvodní části se seznámíme s pojmem elektromobil. Další část se zabývá rozdělením elektrochemických zdrojů a vysvětlením základních pojmů v oblasti akumulátorů. Je zde uveden přehled nejpoužívanějších typů baterií a zhodnocení jejich vlastností. Poslední část je zaměřena na konkrétní typ baterie a popis jejich charakteristik. Součástí jsou také návrhy testů pro určení aktuální kapacity, životnosti, zatížení a vnitřního odporu v závislosti na teplotě.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

HOSTAŠA, M. *The Electric Vehicle Batteries Testing*: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control and Instrumentation, 2012, 38 p. Thesis head: Kulhánek, J.

Topic of the bachelor project is testing and using batteries in electric vehicles. You can find explanation of electric vehicle in the first part. Next part is about division of electrochemical sources and explains some basic terms of batteries. You can also find an overview of the most popular types of batteries and evaluation of their properties there. The last part of this bachelor project is focused on specific battery type and description of properties. Project also includes proposals for tests to determine the current capacity, life cycle, load and internal resistance depending on temperature.

OBSAH

	strana
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLU	7
1 ÚVOD.....	8
2 ELEKTRICKÉ AUTOMOBILY.....	9
3 ELEKTROCHEMICKÉ ZDROJE.....	10
3.1 Základní pojmy	11
3.2 Typy akumulátorů	12
3.2.1 Olověné akumulátory.....	12
3.2.2 Nikl-kadmiové akumulátory.....	13
3.2.3 Nikl-metal hydridové akumulátory.....	14
3.2.4 Lithium-iontové akumulátory.....	15
3.2.5 Lithium-železo-fosfátové akumulátory	16
4 VÝBĚR BATERÍ	17
5 MĚŘICÍ A TESTOVACÍ PRACOVNÍSTĚ	25
6 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE	27
6.1 Návrh testu životnosti baterie.....	27
6.2 Měření vnitřního odporu.....	29
6.3 Měření kapacity baterie.....	31
6.4 Zatížení baterie v běžném provozu	32
ZÁVĚR.....	36
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	37

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLU

DOD	Hloubka vybití.	
ECE	Emisní test.	
EUDC	Mimoměstský jízdní cyklus.	
LFP	Typ baterií.	
MOSFET	Typ tranzistoru.	
PWM	Pulzní šířková modulace.	
Plug-in	Technologie nabíjení hybridních vozů.	
UDC	Městský jízdní cyklus.	
a	Zrychlení.	$[m \cdot s^{-2}]$
C_N	Jmenovitá kapacita.	[Ah]
F	Mechanická síla.	[N]
I	Elektrický proud.	[A]
I_V	Vybíjecí proud.	[A]
I_Z	Proud zátěží.	[A]
m	Hmotnost.	[kg]
R	Elektrický odpor.	$[\Omega]$
R_{dc}, R_i	Vnitřní odpor.	$[\Omega]$
s	Dráha.	[m]
t	Čas.	[s]
t_V	Doba vybíjení.	[s]
U_0	Napětí na prázdko.	[U]
U_N	Jmenovité napětí.	[U]
U_Z	Svorkové napětí zátěže.	[U]
v	Rychlost.	$[m \cdot s^{-1}]$
W_M	Mechanická práce	[J]
W_E	Elektrická práce.	[J]

1 ÚVOD

Za největšího znečišťovatele ovzduší můžeme považovat silniční dopravu. V dnešní době se rozvíjející trend ochrany životního prostředí v automobilovém průmyslu volá po nahrazení neefektivní technologie spalovacích motorů. Stále rostoucí cena ropy, růst její spotřeby na celém světě a omezené zásoby představují velké problémy do budoucna. Řešením je vývoj alternativních druhů pohonů, mezi které řadíme využití elektrické energie.

Elektrickou energii lze opakovaně ukládat v bateriích. Množství energie, kterou jsme schopni v bateriích uchovávat, představuje kapacita. Kapacita baterií se v dnešní době pohybuje řádově až ve stovkách ampérhodin a vývoj baterií se neustále posouvá kupředu. Abychom byli schopni této energie účinně využívat, je nutné znát vlastnosti a chování těchto zařízení. Na trhu se pohybuje nepřehledné množství baterií s rozdílnými parametry. Pouze některé však splňují požadavky pro využití v automobilovém průmyslu.

Ke zjištění potřebných parametrů baterií lze zavést řadu testů. Mezi hlavní testované parametry patří spolehlivost a výdrž baterie. Při testování je nutné navrhnout postup, který ověřuje životnost baterie udávanou výrobcem. Dalším podstatným parametrem je chování baterie při různých teplotách v průběhu ročních období. Tento problém jsme schopni objasnit měřením vnitřního odporu baterie, který nám poskytne představu o teplotní závislosti baterie. Mezi další důležité parametry patří dojezdová vzdálenost elektromobilu, která je nejvíce ovlivněna kapacitou baterie. Posledním a neméně důležitým testem je simulace provozu elektromobilu v městském prostředí. Výsledky tohoto testu nám poskytnou informace o okolnostech, které baterie nejvíce zatěžují, popř. jak by baterie mohly zpětně získávat alespoň část své vydané energie.

Cílem práce je vytvoření rešeršní studie zabývající se problematikou baterií použitých v elektromobilech. Popsání jejich technických parametrů, použitých technologií a správný výběr baterie pro potřeby elektromobilu. Praktickým cíle práce je testování vybraného typu baterie a srovnání výsledků testovaných parametrů s parametry, které uvádí výrobce. Hlavními testovanými parametry je životnost, chování baterie při různých teplotách, dojezdová vzdálenost elektromobilu a chování elektromobilu v městském prostředí.

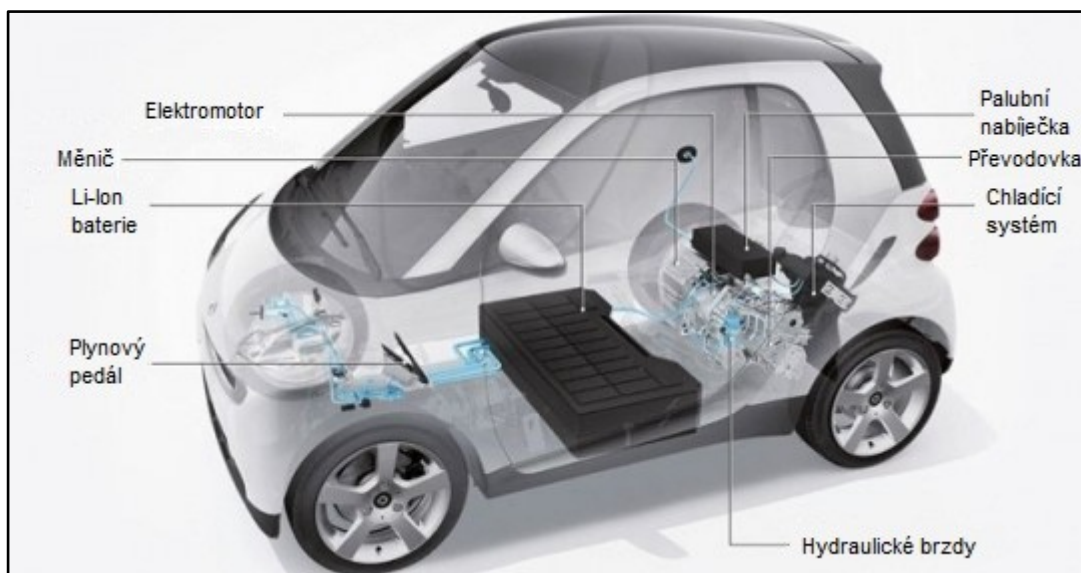
2 ELEKTRICKÉ AUTOMOBILY

Elektromobily jsou vozidla poháněna elektrickou energií, která se ukládá v akumulátorech. Velikost kapacity akumulátoru určuje dojezdovou vzdálenost elektromobilu, která se prodlužuje takzvanou rekuperací (dobíjením) při brzdění elektromotorem nebo rychle dobíjením na dobíjecích stanicích. Počet těchto stanic neustále roste.

Mezi hlavní výhody elektromobilu patří především nulová produkce emisí a vysoká účinnost. V případě použití asynchronního motoru dosahuje účinnost až 90 procent oproti 30 až 40 procentní účinnosti spalovacích motorů. Celková účinnost pohonu závisí rovněž na účinnosti výroby elektrické energie pro pohon z primárního zdroje a energetické účinnosti použitých akumulátorů (ta se pohybuje kolem 50 až 80 procent dle použité technologie: olovo, Ni-Cd, Ni-MH, Li-Ion, LiFePO₄). Rekuperací lze zvýšit využití energie v členitém terénu nebo městském provozu až o 25 procent. [Verg, 2008]

Jednoznačnými přednostmi elektromobilu jsou:

- možnost využívat obnovitelnou energii s vysokou účinností
- možnost okamžitého maximálního výkonu
- možnost opakovaného a mnohonásobného přetížení
- rekuperace energie
- absence hluku, emisí, vibrací
- přesnost a jednoduchost ovládání



Obr. 1 Elektromobil Smart [Evtalk, 2010]

3 ELEKTROCHEMICKÉ ZDROJE

Elektrochemické zdroje jsou zařízení, ve kterých dochází k přeměně chemické energie na energii elektrickou. Při vybíjení zdroje nastává elektrochemická reakce, jejíž energie se uvolňuje jako energie stejnosměrného proudu. Jedná se o přímou přeměnu energií, která není ovlivněna jinými typy energie (tepelnou, mechanickou) a účinnost přeměny je velmi malá.

Rozdělení chemických zdrojů

Podle principu se elektrochemické zdroje dělí do tří skupin. První skupinu tvoří primární články, druhou články sekundární neboli akumulátory a třetí články palivové. Zvláštní skupinou jsou takzvané přechodové články, které využívají dva z uvedených principů. Nazývají se kombinované a obnovitelné. V našem případě se zaměříme pouze na primární a sekundární články.

Primární články

Tyto články mají omezené množství reaktantů. Při vybíjení článku se reaktanty spotřebovávají a nelze je nabíjením znovu převést na původní reaktanty. Jedná se tedy o článek, který je přizpůsoben pouze pro jedno vybití. Mezi nejběžnější primární články patří články s burelovou (MnO_2) katodou, zinkovou anodou a solným elektrolytem, které se podle svého vynálezce nazývají Leclanchéovy články. [Cenek, 2003]

Sekundární články

Sekundární články obsahují také omezené množství reaktantů. Avšak lze je nabíjením převést zpět na původní aktivní reaktanty. Jsou to tedy články použitelné pro více vybití. Elektrická energie potřebná pro nabití článku se uchovává ve formě chemické energie a články se označují jako akumulátory. Jeden článek disponuje většinou nízkým napětím, proto je nutné použít více článků, ze kterých vytváříme akumulátorové baterie. Dle použitelného elektrolytu můžeme dělit akumulátory na kyselé (olověné), alkalické (Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-MH) a akumulátory s nevodnými, tuhými elektrolyty. [Cenek, 2003]

Akumulátory jsou schopné snést stovky až tisíce nabití a vybití. Parametr, který tento počet charakterizuje je životnost, která se udává v cyklech. Kvalita akumulátoru je ovlivněna takzvaným stárnutím, samovybíjením, způsobem zacházení a dalšími okolnostmi.

Rozdělení podle použití

- Průmyslové baterie – dělíme na staniční akumulátory s kapacitou článku řádově od desítek do desetitisíce ampérhodin a trakční akumulátory s kapacitou od desítek do tisíce ampérhodin.
 - Staniční baterie – jsou trvale dobíjeny a slouží jako záložní zdroje energie při výpadku rozvodné sítě v energetice, telekomunikaci apod.
 - Trakční baterie – využívají se pro pohon elektromobilů, elektrických vozíků a dalších zařízení. Baterie jsou založeny na pomalém odběru proudu, aby vydržely ve stavu nabití co nejdéle.
 - Startovací baterie – slouží jako zdroj elektrické energie pro spalovací motory. Tyto baterie jsou při startování vystaveny vysokým vybíjecím proudům, kdy jejich kapacita jen nepatrně klesne. Baterie jsou však dobíjeny za chodu motoru v téměř nabitěm stavu.
 - Přístrojové baterie – slouží jako zdroj elektrické energie pro nejrůznější přenosná zařízení. Dle druhu zařízení se používají primární nebo akumulátorové baterie.
- [Cenek, 2003]

3.1 Základní pojmy

Jmenovité napětí U_N – je napětí jednoho článku (obvykle zaokrouhlená hodnota středního vybíjecího napětí). Jeho hodnota se mění v závislosti na použitém druhu článku nebo baterie.

Jmenovitá kapacita C_N – je množství elektrického náboje. Udává ji výrobce článku nebo baterií zpravidla v ampérhodinách (Ah). Např. C_{10} znamená, že při uvedené kapacitě má akumulátor poskytnout po dobu 10 hodin vybíjecí proud roven desetíně jmenovité kapacity $I_V=0,1C_{10}$ (A).

Vybíjecí proud I_V – je proud, kterým je baterie vybíjena. Udává se v ampérech (A). Popisuje se nejčastěji indexem označujícím dobu vybíjení v hodinách např. I_5 (A) pro 5 hodin vybíjení nebo v násobku kapacity např. $I_V=2 C_N$ (A).

Vnitřní odpor R_i – je označován jako poměr změny napětí článku a odpovídající změny proudu za určitých podmínek. Je dán odporem elektrolytu mezi elektrodami článku.

Doba vybíjení t_V – je doba, po kterou se baterie vybíjí na minimální hodnotu napětí. Závisí na vybíjecím proudu. Zpravidla se udává v hodinách.

Samovybíjení – je ztráta kapacity článku způsobena vnitřními chemickými reakcemi článku, který není připojen ke zdroji elektrické energie. Rychlost úbytku kapacity je značně závislá na okolní teplotě. Udává se v procentech jmenovité kapacity.

Životnost – je doba používání baterie za předepsaných podmínek. Vyjadřuje se zpravidla počtem cyklů nebo dobou, po kterou je baterie za daných provozních podmínek plně funkční.

Hustota energie – je poměrný údaj vyjadřující schopnost akumulovat elektrickou energii. V případě baterií se vztahuje na jednotku hmotnosti (Wh/kg). [Cenek, 2003]

3.2 Typy akumulátorů

Typy akumulátoru rozlišujeme podle jejich chemického složení. V našem případě si představíme akumulátory olověné, Ni-Cd, Ni-MH, Li-Ion, LiFePO₄ a zhodnotíme jejich výhody a nevýhody.

3.2.1 Olověné akumulátory

V nabitém stavu je záporná elektroda tvořena houbovým olovem (Pb), okolo kladné elektrody je vázán oxid olovičitý (PbO₂). Elektrolyt tvoří voda (H₂O) zředěná s kyselinou sírovou (H₂SO₄). Elektrolytický roztok může být z technických důvodů nasáknutý do vaty ze skelných vláken nebo ztužený do formy gelu. Při vybíjení se aktivní hmota na obou elektrodách přeměňuje na síran olovnatý (PbSO₄) a elektrolyt je ochuzován o kyselinu sírovou a obohacován o vodu. Koncentrace elektrolytu při vybíjecím cyklu klesá a naopak při nabíjecím cyklu koncentrace roste. Životnost olověného akumulátoru je ovlivněná jeho setrváním ve vybitém stavu. Pokud se v tomto stavu nachází delší dobu, dochází na elektrodách k prakticky nevratným změnám tzv. sulfaci. Tento děj výrazně snižuje kapacitu akumulátoru. Olověné akumulátory jsou díky svým parametrům ideální pro klasické automobily. S ohledem na ekologii jsou tyto baterie nejhorší variantou, protože jsou velmi toxické. [Krátký, 2010]

Výhody olověných akumulátorů

- Cenová dostupnost.
- Akumulátor je schopen dávat velké proudy.

Nevýhody olověných akumulátorů

- Malá hustota energie na kilogram (30-40 Wh/kg).
- Nižší účinnost dobíjení (70-92%).
- Menší počet dobíjecích cyklů (500-800).
- Nutná ekologická likvidace.

3.2.2 Nikl-kadmiové akumulátory

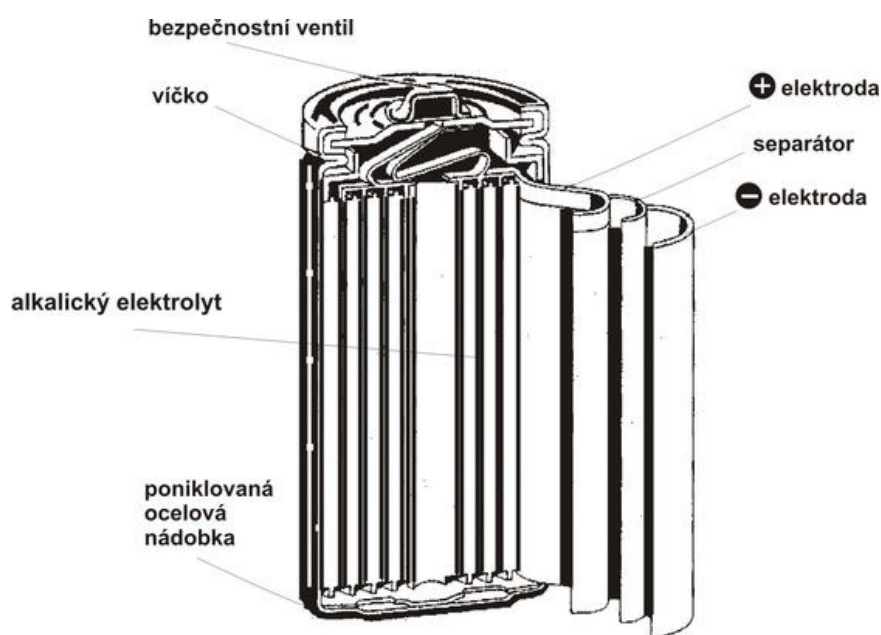
Zkráceně Ni-Cd, je to druh galvanického článku. Akumulátor je složen ze tří vrstev. Kladnou elektrodu tvoří hydroxid niklu (Ni(OH)_2), zápornou elektrodu tvoří kadmium (Cd). Elektrody odděluje separátor obsahující elektrolyt tvořený hydroxidem draselným (KOH). Tyto akumulátory jsou odolné vůči skladování ve vybitém stavu. Tzv. paměťový efekt vzniká důsledkem častého nabíjení příliš nízkým proudem. Na elektrodách se vytváří drobné krystalky, což může zkrátit dobu provozu až o 90%, dochází k nárůstu vnitřního odporu a při zatížení napětí klesne. [Krátký, 2010]

Výhody Ni-Cd akumulátorů

- Možnost skladovat v dlouhodobě vybitém stavu.
- Počet dobíjecích cyklů více než 2000.

Nevýhody Ni-Cd akumulátorů

- Menší hustota energie na kilogram (40-60 Wh/kg).
- Nižší účinnost dobíjení (66-90%).
- Dražší výroba a tedy i vyšší cena.
- Paměťový efekt.
- Rychlé samovybíjení (až 20% / měsíc).
- Nutná ekologická likvidace.



Obr. 2 Průřez Ni-Cd akumulátoru [Bateria, 2008]

3.2.3 Nikl-metal hydridové akumulátory

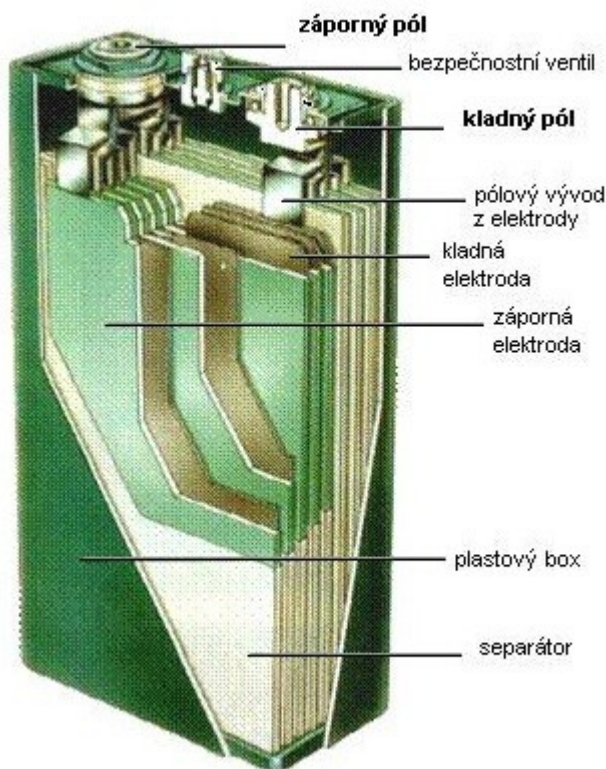
Zkráceně Ni-MH, je jedním z nejpoužívanějších druhů akumulátorů. V porovnání s Ni-Cd akumulátorem má téměř dvojnásobnou až trojnásobnou kapacitu. Kladnou elektrodu tvoří hydroxid niklu (Ni(OH)_2), zápornou elektrodu tvoří kovová slitina schopná vázat vodík, která nahradila jedovaté kadmium. Obě elektrody odděluje separátor obsahující alkalický elektrolyt tvořený hydroxidem draselným (KOH). [Krátký, 2010]

Výhody Ni-MH akumulátorů

- Cenová dostupnost.
- Akumulátor je schopen udržet napětí až do úplného vybití.

Nevýhody Ni-MH akumulátorů

- Nižší hustota energie na kilogram (30-80 Wh/kg).
- Nižší účinnost dobíjení (66%).
- Menší počet dobíjecích cyklů 1000.
- U některých typů rychlé samovybití (až 20% / měsíc).
- Paměťový efekt.



Obr. 3 Průřez Ni-MH akumulátoru [Electroauto, 2005]

3.2.4 Lithium-iontové akumulátory

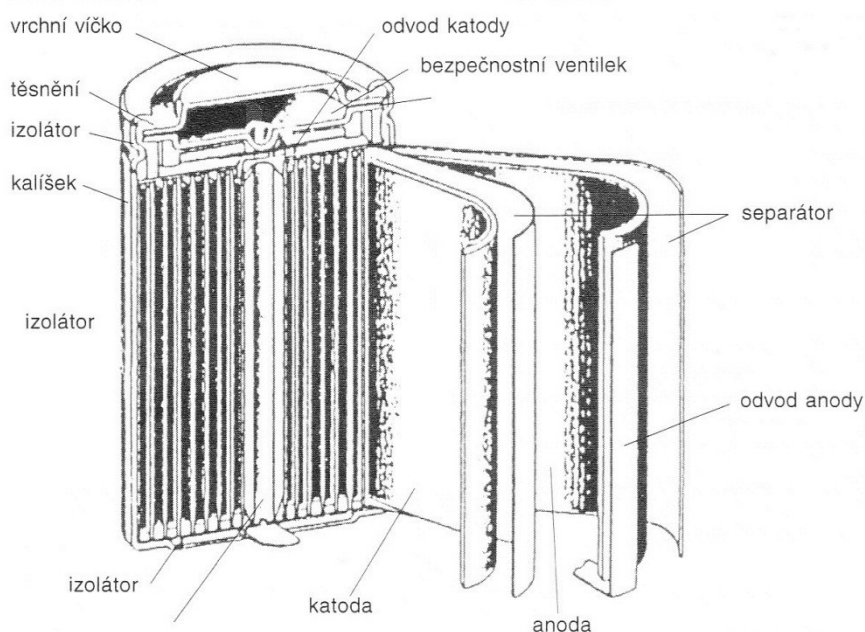
Zkráceně Li-Ion, u tohoto typu akumulátoru se lithium ionty pohybují mezi uhlíkovou anodou a katodou tvořenou oxidem kovu. Elektrolyt je tvořen lithiovou solí v organickém rozpouštědle. Každá baterie obsahuje čip, který hlídá stav a kontroluje průběh nabíjení. Vysoká hustota energie vzhledem k objemu se výborně hodí pro přenosná zařízení. Tento typ akumulátoru nepodléhá paměťovému efektu. Hlavní stinnou stránkou těchto baterií je jejich stárnutí, což je výrazné snižování kapacity nezávisle na používání. Oproti Ni-Cd a Ni-MH akumulátorům mají Li-Ion baterie vyšší vnitřní odpor, proto není možné z nich získat tak vysoký proud. V případě přehřátí nebo připojení vyššího napětí může baterie explodovat. [Krátký, 2010]

Výhody Li-Ion akumulátorů

- Velmi vysoká hustota energie (160 Wh/kg).
- Možnost výroby v téměř libovolných tvarech.
- Nepodléhá paměťovému efektu.
- Pomalé samovybíjení.
- Vysoké nominální napětí.
- Dobrá dobíjecí účinnost (80-90%).

Nevýhody Li-Ion akumulátorů

- Velmi rychlé stárnutí baterie (životnost 2-3 roky).
- Při špatném zacházení explozivní.
- Při úplném vybití je téměř vždy zničená.



Obr. 4 Průřez Li-Ionovou baterií [Cenek, 2003]

3.2.5 Lithium-železo-fosfátové akumulátory

Zkráceně LiFePO_4 , je to druh lithium-iontového akumulátoru. Toto označení získaly díky záporné elektrodě vyrobené z tohoto materiálu. Mají mnoho společných vlastností s lithium-iontovými bateriemi. Tento typ baterií se vyznačuje vysokou bezpečností (odolnost proti tepelným vlivům), schopnost dodávat vysoký proud ve špičkách, menším vlivem stárnutí, to znamená pomalejší snižování kapacity. [Krátký, 2010]

Výhody LiFePO_4 akumulátorů

- Téměř plochá křivka až do úplného vybití akumulátoru.
- Vysoký počet dobíjecích cyklů (2000 - 3000).
- Netoxické.
- Nepodléhá paměťovému efektu.
- Vysoká životnost (3-10 let).
- Vynikající dobíjecí účinnost (95%).
- Cenová dostupnost.
- Vyšší hustota energie (80-120 Wh/kg).

Nevýhody LiFePO_4 akumulátorů

- Rychlé dobíjení snižuje životnost.
- Možnost předčasného selhání při větším množství hlubokých cyklů (vybití pod 33%).



Obr. 5 Baterie LiFePO_4 [Calb, 2009]

4 VÝBĚR BATERIÍ

Nejdůležitějšími parametry při výběru baterií je jmenovitá kapacita, jmenovité napětí, vybíjecí a nabíjecí proud, životnost, úroveň samovybíjení a teplotní odolnost.

Základní kritéria pro výběr baterií

- Velikost kapacity volíme podle požadavků na provoz. Například elektromobil Nissan Leaf využívá přibližně 150 až 250 Wh/km v závislosti na terénu a stylu jízdy.
- Baterie musí být schopna pravidelného vybití s ohledem na životnost.
- Musí být navržena tak, aby byla schopna poskytnout plný výkon i při stavu úplného vybití.
- Musí tolerovat časté vysoké pulzní nabíjecí proudy při rekuperaci.
- Odolná vůči častému dobíjení.
- Zapojením více baterií by celkové napětí mělo dosahovat více než 400V a kapacity vyšší než 40 až 80 kWh.

Zmíněným kritériím vyhovují v dnešní době nejmodernější a v elektromobilech nejvíce využívané LiFePO_4 akumulátory. Proto bylo rozhodnuto pro jejich využití i při našem testování. Na trhu se pohybuje velké množství těchto výrobků a je volit baterie s kapacitou od 20Ah až do 1000Ah. Tyto baterie je možné spojovat do větších celků a dosahovat tak velmi vysokých kapacit. Při rozhodování, jakou baterii zvolit, jsme se řídili cenou v závislosti na jmenovité kapacitě. Rozhodli jsme se pro baterie od firmy Winston dřívější ThunderSky, Dow Kokam a Hipower se jmenovitou kapacitou 100Ah. Cena těchto baterií se pohybuje okolo 130 dolarů. Nyní si popíšeme parametry baterie Winston TS-LFP100AHA. Maximální hodnota napětí, na které můžeme baterii nabít je 4,25V. Při vybíjení by napětí baterie nemělo poklesnout pod 2,5V. Povolený maximální nabíjecí proud je 3CA, což je v našem případě 300A. Baterie může být vybíjena konstantním proudem 300A a v případě vybíjení impulsním proudem až 2000A. Výrobce doporučuje pro nabíjení i vybíjení používat proud 50A. Životnost baterie závisí na hloubce vybití. Při 80 procentní hloubce vybití bychom měli dosáhnout více než 3000 cyklů. Důležitým parametrem je bezpečnost. Baterie v elektromobilech podléhají účinkům okolních vlivů, jako jsou mechanická namáhání a teplotní výkyvy během letního a zimního období. Tyto články však disponují velkou tepelnou odolností a jejich provozní teplota se může pohybovat v rozmezí -45°C až 85°C. Vysoká je také odolnost pouzdra baterie, které v případě přehřátí odolá teplotě až 200°C. Díky tomu, že baterie nepodléhají paměťovému efektu je možné je nabíjet v jakémkoli stavu vybití, což je v běžném provozu velmi praktické. Úroveň samovybíjení této baterie je menší než 3 procenta za měsíc.

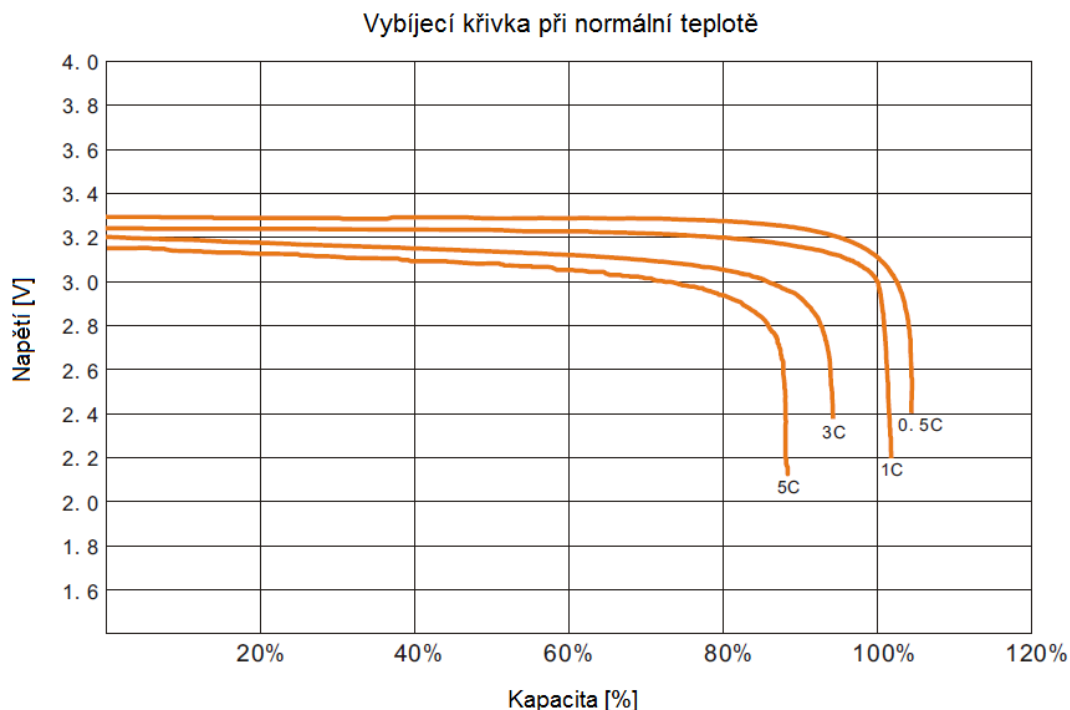
Baterie Winston TS-LFP100AHA

Tab. 1 Parametry baterie Winston [Winston, 2007]

Výrobce: Winston	Model: TS-LFP100AHA	
Jmenovitá kapacita	100Ah	
Pracovní napětí	Nabíjení do	4,25V
	Vybíjení do	2,5V
Maximální nabíjecí proud	$\leq 300\text{A}$	
Maximální vybíjecí proud	Konstantní proud	$\leq 300\text{A}$
	Impulsní proud	$\leq 2000\text{A}$
Standardní nabíjecí/vybíjecí proud	50A	
Životnost	(80DOD%)	≥ 3000 cyklů
	(70DOD%)	≥ 5000 cyklů
Teplotní odolnost pouzdra	$\leq 200^\circ\text{C}$	
Provozní teplota	Pro nabíjení	$-45^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$
	Pro vybíjení	$-45^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$
Samovybíjení	$\leq 3\%$ za měsíc	

O chování baterie více napoví jejich charakteristiky.

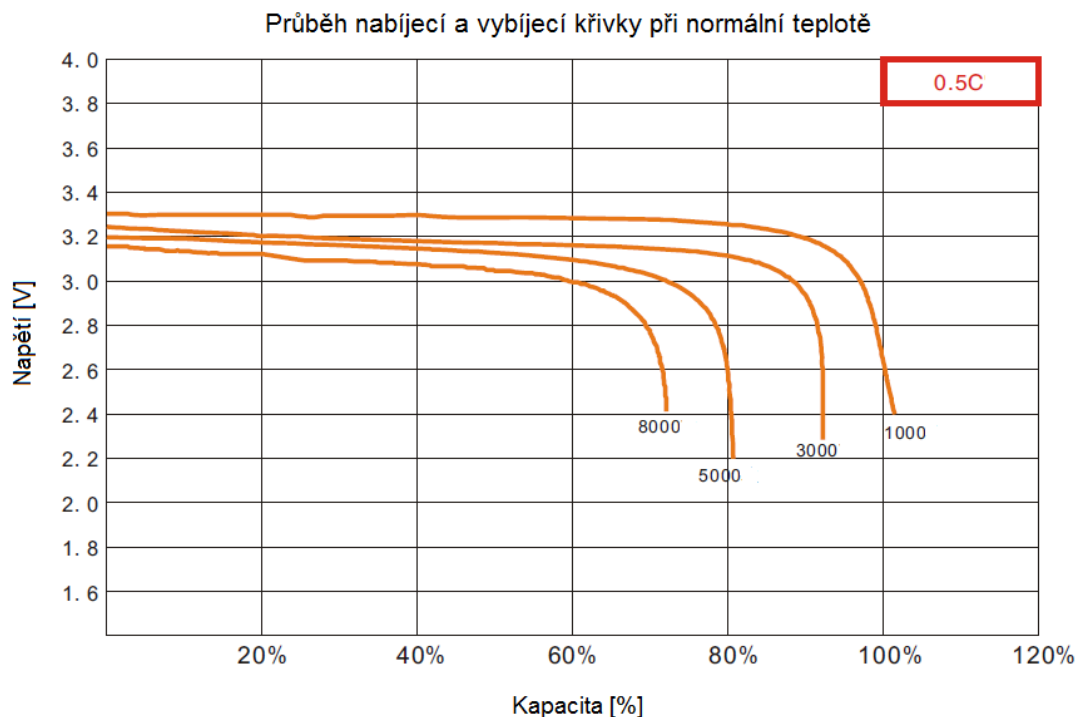
Charakteristiky udávané výrobcem:



Obr. 6 Vybíjecí křivka baterie Winston TS-LFP100AHA [Winston, 2007]

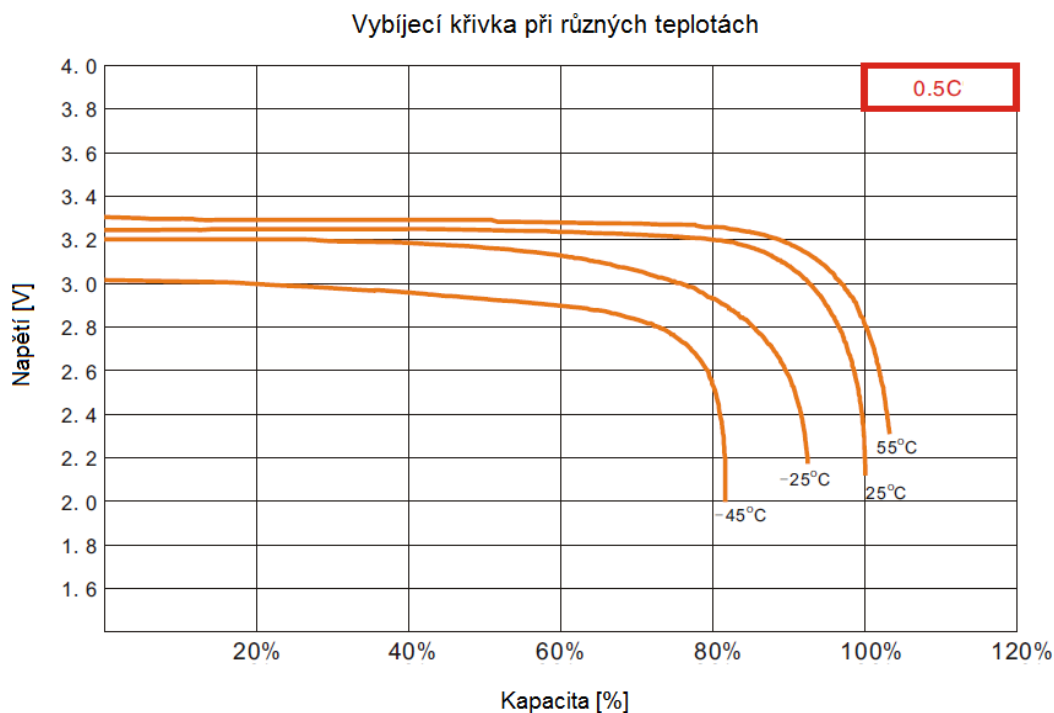
Vybíjecí charakteristika znázorňuje pokles pracovního napětí v závislosti na hodnotě vybíjecího proudu. Čím vyšší bude vybíjecí proud, tím strměji bude hodnota napětí klesat. Při kapacitě mezi 20-80 procenty lze nejlépe určit tvrdost akumulátoru, v ideálním případě

je zde křivka téměř vodorovná. Čím bude sklon větší, tím bude článek měkký. Měkký akumulátor má velký vnitřní odpor řádově stovky ohmů.



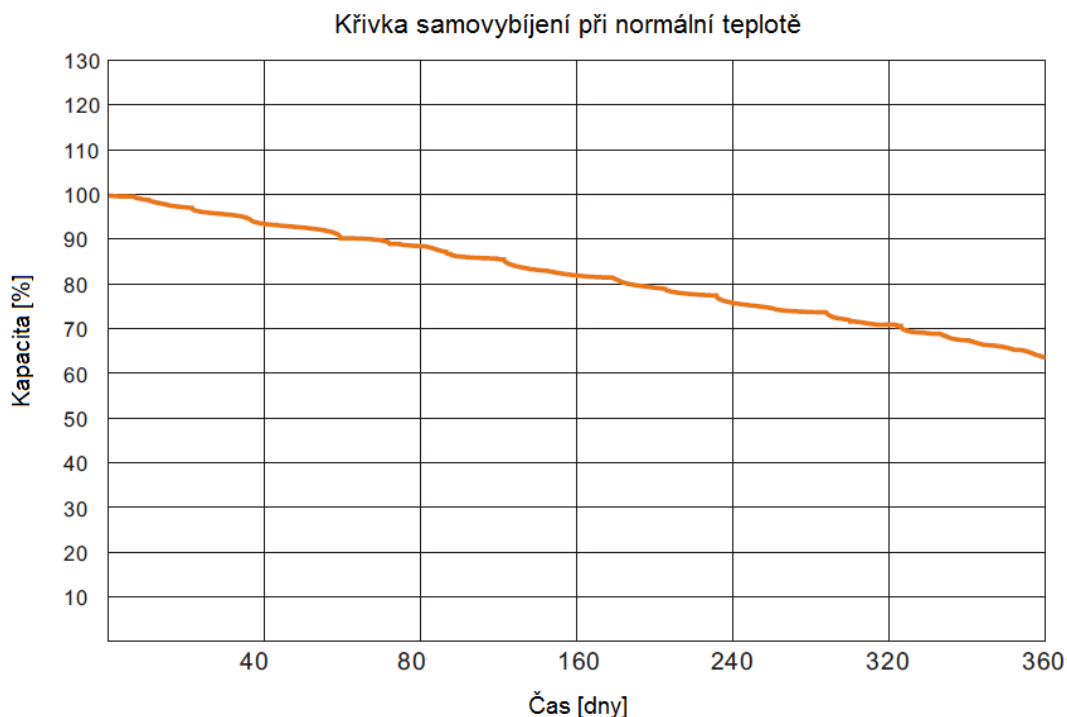
Obr. 7 Nabíjecí a vybíjecí křivka baterie Winston TS-LFP100AHA [Winston, 2007]

Na obr. 7 je zobrazena křivka životnosti v závislosti na hloubce vybití. Vybíjecí proud má konstantní hodnotu 50A. S rostoucí hloubkou vybití dochází ke snižování počtu cyklů nabití a vybití. Při vybití na 80 procent kapacit bychom měli dosáhnout téměř 5000 nabíjecích a vybíjecích cyklů. V případě vybití do 100 procent jmenovité kapacity bychom dosáhli pouze pětinaové hodnoty.



Obr. 8 Vybíjecí křivka při různých teplotách baterie Winston TS-LFP100AHA [Winston, 2007]

Na obr. 8 je zobrazena závislost pracovního napětí článku na teplotě, při standardním vybíjecím proudu 50A. Z grafu je patrné, že s klesající teplotou výrazně klesá hodnota dostupné kapacity článku. Naopak s rostoucí teplotou roste i hodnota kapacity a napětí článku klesá pomaleji.



Obr. 9 Křivka samovybíjení baterie Winston TS-LFP100AHA [Winston, 2007]

Optimální podmínky pro skladování lithiových baterií jsou při teplotě 0°C až 25°C. Lithiové články skladujeme vždy v nabitém stavu. Samovybíjení lithiových článků se pohybuje mezi 1 až 3 procenty za měsíc. V důsledku samovybíjení klesá náboj článku. Doporučuje se proto, každých 6 až 12 měsíců nabít baterii na 40 až 50 procent jmenovité kapacity. [Kincl, 2011]

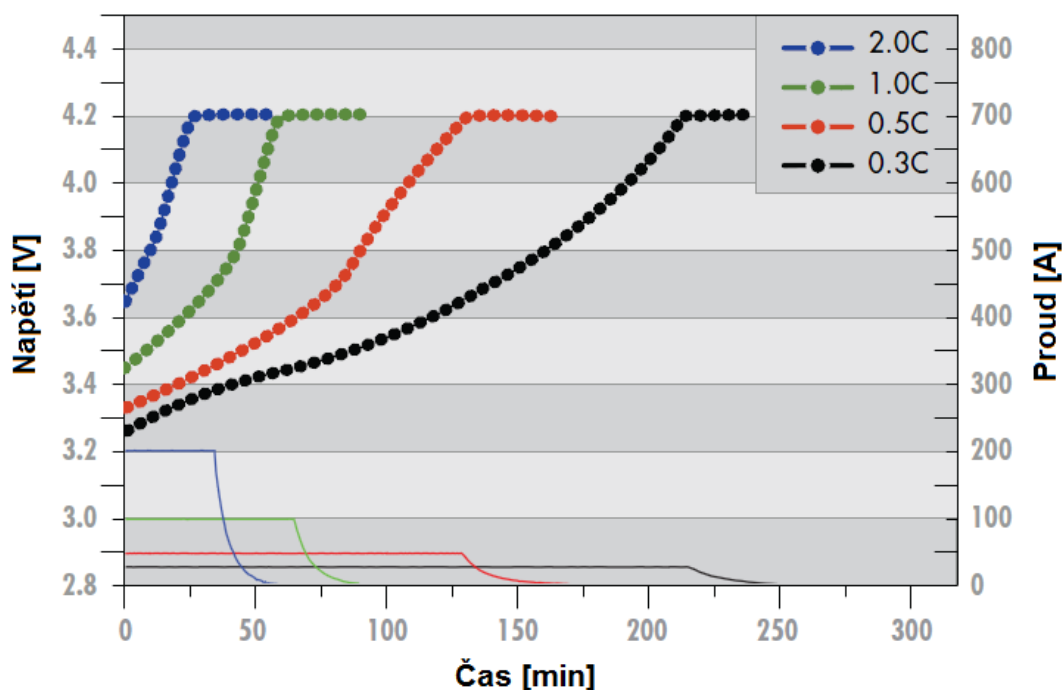
Baterie Dow Kokam SLPB70460330

Tab. 2 Parametry baterie Dow Kokam [Dow Kokam, 2010]

Výrobce: Dow Kokam Model: SLPB 70460330		
Jmenovitá kapacita		100Ah
Jmenovité napětí		3,7V
Nabíjení	Maximálním proudem	100A
	Maximální napětí	4,2V
Vybíjení	Stejnoseměrným proudem	100A
	Maximálním proudem	300A
	Minimální napětí	2,7V
Životnost	(80%DOD)	> 3000 cyklů
Provozní teplota	Pro nabíjení	0°C~45°C
	Pro vybíjení	-20°C~60°C

Charakteristiky udávané výrobcem:

Nabíjecí charakteristika při normální teplotě

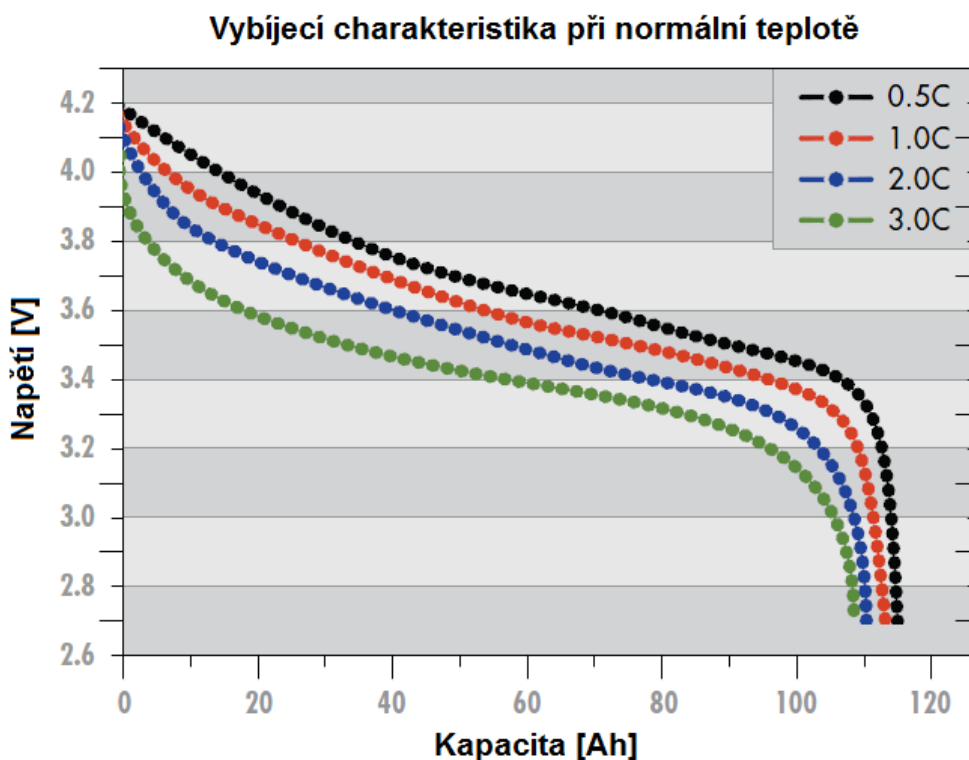


Obr. 10 Nabíjecí charakteristika baterie Dow Kokam SLPB 70460330 [Dow Kokam, 2010]

Nabíjecí metoda, kterou obr. 10 ilustruje, se označuje jako CC - CV (Constant Current - Constant Voltage). Nabíjení článku by se dalo rozdělit do dvou fází. V první fázi se článek nabíjí konstantním proudem. Tento stav trvá přibližně do 80 procent nabíjecího času a napětí na článku zde dosáhne svého maxima. Při nabíjení roste také náboj, avšak v tomto okamžiku článek není ještě plně nabit. Od této doby začne nabíjení konstantním

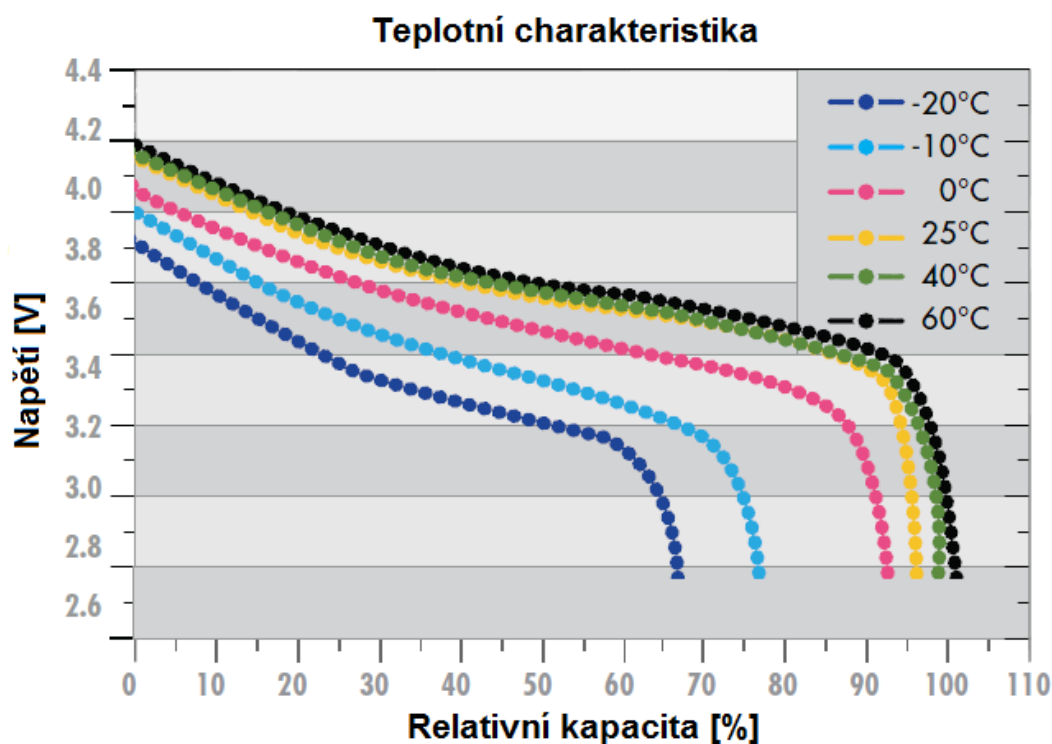
napětím a nabíjecí proud se začíná poměrně rychle zmenšovat. Jakmile nabíjecí proud klesne pod hodnotu 0,05C je článek již plně nabitý.

Jsou-li články úplně nové, doporučují výrobci provést asi tři nabíjecí a vybíjecí cykly nízkými proudy (řádově desetiny C). Po absolvování této procedury už mohou být akumulátory nabíjeny i vybíjeny maximálními proudy, které výrobce uvádí.



Obr. 11 Vybíjecí charakteristika baterie Dow Kokam SLPB 70460330 [Dow Kokam, 2010]

Vybíjecí charakteristika kromě počátku a konce mírně klesá. Po připojení zátěže klesne napětí naprázdno na hodnotu středního vybíjecího napětí, jehož velikost udává velikost vybíjecího proudu a dále se snižuje jen pozvolna. Pokud se článek blíží ke stavu vybití, začne napětí poměrně rychle klesat. Vybíjení je nutné ukončit při dosažení minimálního napětí, v tomto případě 2,7V. Z grafu na obr. 11 je patrné, že s rostoucím vybíjecím proudem klesá i střední vybíjecí napětí. Za normální teplotou v tomto případě považujeme teplotu 23°C.



Obr. 12 Teplotní charakteristika baterie Dow Kokam SLPB 70460330 [Dow Kokam, 2012]

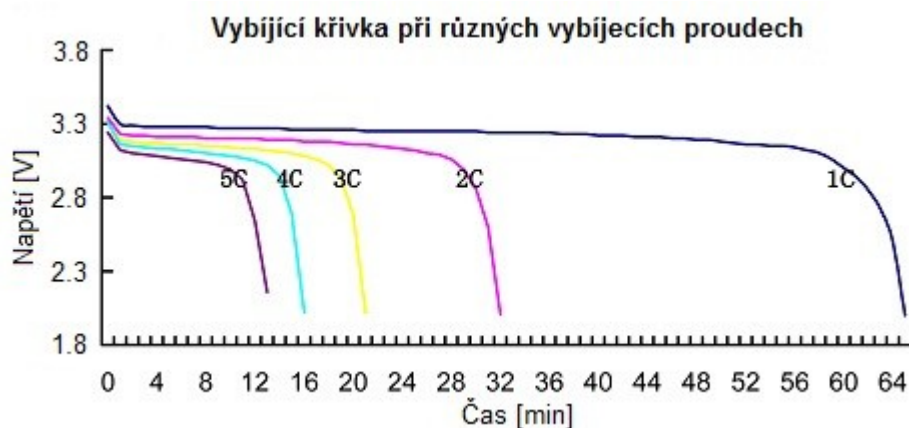
Při používání tohoto typu zdroje elektrické energie musí být také dbáno na provozní a skladovací teplotu. Výrobce udává provozní teplotu článků v rozsahu -20°C až 60°C . Provoz baterie při nízké teplotě způsobuje pokles její kapacity. Jak je vidět na obr. 12, čím je teplota nižší, tím menší je hodnota dostupné kapacity a vybíjení se tak urychluje. Při vyšších teplotách dochází k urychlení chemických reakcí a baterie dosahují 100 procent své kapacity.

Baterie Hipower HP-PW-100AHA

Tab. 3 Parametry baterie Hipower [Hipower, 2012]

Výrobce: Hipower Model: HP-PW-100AHA		
Jmenovitá kapacita		100Ah
Jmenovité napětí		3,2V
Vnitřní odpor		$\leq 1\text{m}\Omega$
Standardní nabíjecí/vybíjecí proud		33A
Nabíjení	Maximálním proudem	300A
	Maximální napětí	3,6V
Vybíjení	Maximálním proudem	500A
	Minimální napětí	2,0V
Životnost	(80%DOD)	> 2000 cyklů
Provozní teplota	Pro nabíjení	0°C~45°C
	Pro vybíjení	-20°C~60°C

Baterie od firmy Hipower se od svých konkurentů liší svým nižším jmenovitým napětím 3,2V. Kratší je také životnost baterie, která se pohybuje okolo 2000 cyklů. Výrobce ve svém katalogu oproti předchozím bateriím uvádí hodnotu vnitřního odporu. Tato hodnota je definována pro nové baterie při teplotě 23°C, avšak po absolvování několika desítek cyklů nabíjení a vybíjení se změní. Provozní teplota baterie je téměř stejná jako u ostatních, výrobce pouze nedoporučuje baterii nabíjet při teplotách nižších než 0°C.



Obr. 13 Vybíjecí křivka baterie Hipower [Hipower, 2012]

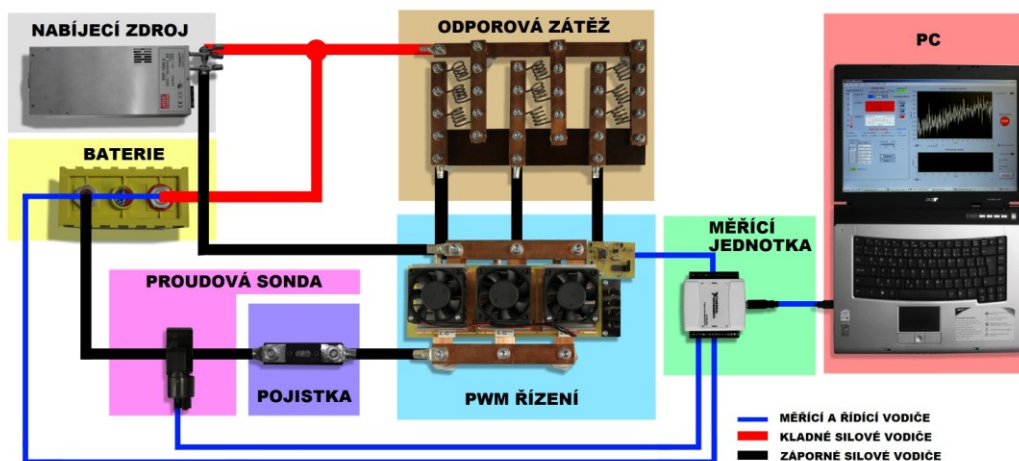
Vybíjecí charakteristika dodávaná výrobcem ukazuje, že pro vybití baterie na minimální hodnotu napětí nám při vybíjecím proudu 100A trvá přibližně hodinu. Pokud budeme baterii proudem 500A, potom je baterie vybita za pouhých 13 minut.

5 MĚŘICÍ A TESTOVACÍ PRACOVNÍSTĚ

Testování baterií bylo prováděno v laboratořích Ústavu progresivních technologií pro automobilový průmysl, fakulty Metalurgie a materiálového inženýrství s použitím jejich testovacího pracoviště. Tento typ pracoviště se skládá z několika základních částí:

1. **Nabíjecí část** je tvořena spínaným napájecím zdrojem MeanWell RSP-1500-5, jehož výstupní napětí je 5V a výstupní proud 240A.
2. **Vybíjecí část** je tvořena odporovou zátěží, která se skládá ze tří větví odporových drátů. Odpor jednotlivých větví regulujeme připojením nebo odpojením odporových drátů.
3. **Ovládací část** je tvořena třemi výkonovými tranzistory typu MOSFET, bylo nutné použít tři tyto tranzistory, z důvodu jejich proudového omezení do 200A. Každý tranzistor je připojen na jednu z větví odporové zátěže. Pro ovládání je zde použita PWM regulace.
4. **Ochranná část** je tvořena stykačem s tlačítkem a pojistkou z důvodu bezpečnosti, protože obvodem protékají vysoké proudy řádově stovka ampér.
5. **Měřicí část** je tvořena měřicí jednotkou, která snímá proud a napětí na baterii. Připojen je také termočlánek, který měří teplotu baterie.

Blokové schéma měřicího pracoviště



Obr. 14 Blokové schéma měřicího pracoviště [Čech, 2011]

PWM regulace

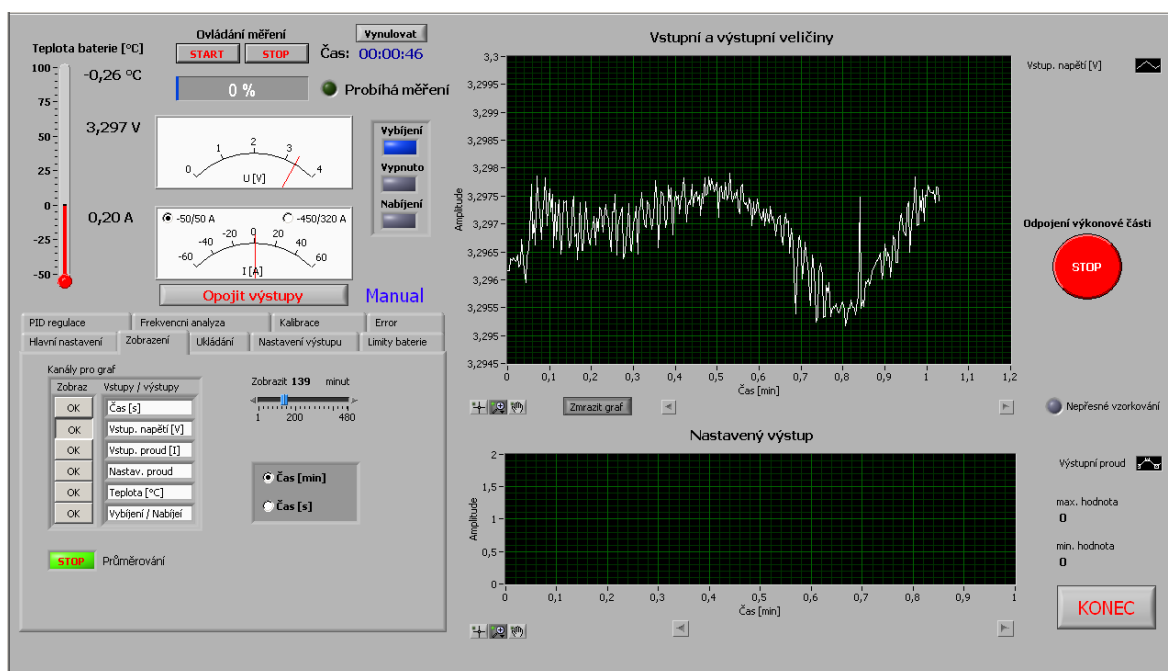
Jedná se o proces, kdy dochází ke změně šířky impulzu nosného signálu při určité konstantní frekvenci. PWM signál má obdélníkový tvar tedy nabývá dvou hodnot „0“ a „1“. Poměr mezi šířkou pulzu a šířkou mezery se nazývá střída. Střída se nejčastěji udává procentuálně. Prvky řízeny touto regulací jsou ovládány napětově např. motor. Čím větší

amplitudu pulzy mají, tím větší je velikost protékajícího proudu v impulzu a jeho velikost určuje točivý moment motoru. Pokud použijeme vysokou frekvenci impulzů, dosáhneme hladšího průběhu a snížíme tak vliv rušení a rostoucí teplotu. Výhodu PWM regulace jsou nízké ztráty a to díky tomu, že výkonové MOSFET tranzistory mají v sepnutém stavu velmi nízký odpor.

Software pro řízení a diagnostiku měřicího řetězce

Tento software byl vytvořen v prostředí programu LabVIEW. LabVIEW je graficky programovatelné prostředí, ve kterém můžeme vytvářet sofistikovaná měření, testování a řídicí systémy s využitím intuitivních grafických ikon a drátů, které se podobají vývojovému diagramu. Nabízí integritu s tisíci hardwarovými zařízeními a poskytuje stovky knihoven pro pokročilou analýzu a vizualizaci dat.

Ovládací software je z grafického hlediska rozdělen do dvou hlavních částí. Část nastavení a část zobrazení. Část zobrazení je tvořena grafy zobrazujícími průběh vstupní a výstupní veličiny. V části nastavení v kartě zobrazení můžeme zvolit kanál pro vykreslení grafu - čas, vstupní napětí, výstupní napětí, proud, teplotu a hodnoty veličin pro nabíjení a vybíjení. Hodnoty zobrazovaných veličin jsou průměrovány. Můžeme také nastavit dobu zobrazení. Další důležitou kartou je nastavení výstupu. V této kartě můžeme nastavovat hodnotu výstupního napětí, velikost amplitudy signálu, vzorkovací periodu a fázový posun. Část nastavení obsahuje měřicí přístroje voltmetr a ampérmetr zobrazující aktuální hodnotu a také ukazatel teploty baterie.



Obr. 15 Ovládací software - ukázka nastavení zobrazení [Juránek, 2011]

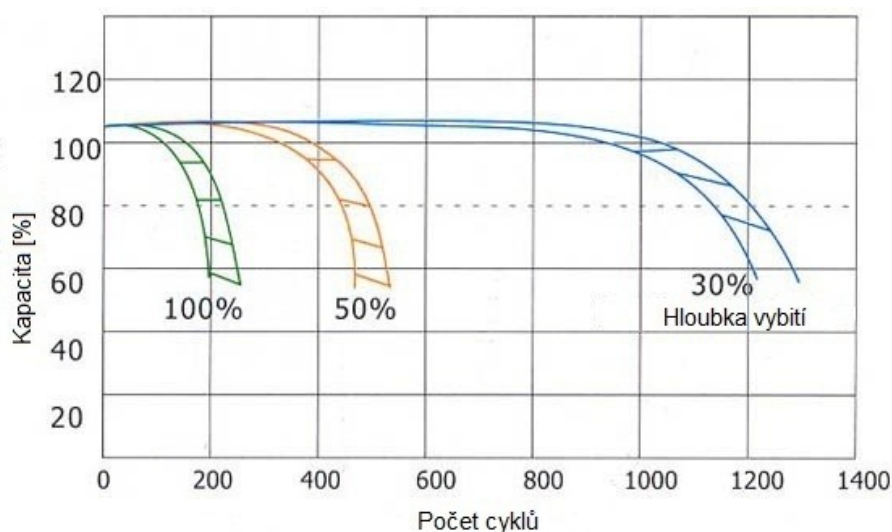
6 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

Vývoj elektromobilů se poslední dobou značně zrychlil. Na trhu můžeme nalézt vozidla různých značek a parametrů. Jedním z hlavních hledisek hodnocení vozů bude dojezdová vzdálenost. Tento parametr je ovlivněn především typem použitých baterií a velikostí jejich kapacity, ale také jejich dalšími vlastnostmi. Úkolem je proto navrhnout univerzální testy, kterým bychom mohli baterie podrobit a určit jejich výhody a nevýhody. Mezi tyto testy určitě patří životnost baterie, velikost vnitřního odporu baterie a velikost aktuální kapacity baterie. Ze zmíněných typů baterií jsme měli k dispozici pouze baterii Winston TS-LFP100AHA.

6.1 Návrh testu životnosti baterie

Významným parametrem akumulátoru je životnost. Je to vztah mezi maximálně dosažitelným počtem vybíjecích a nabíjecích cyklů a stupněm vybíjení článku v každém cyklu (hloubka vybíjení). Při běžném používání nabíjecích článků s rostoucím počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů mírně stoupá maximální využitelná kapacita (řádově o několik procent), avšak po uplynutí několika stovek cyklů (200 až 300) začíná pomalu klesat. Maximální počet cyklů je často definován poklesem využitelné kapacity článku pod hranici 60 procent a tím je dána životnost článku. Dosažením této hodnoty se však článek nestává nepoužitelným, má pouze nižší kapacitu, která klesá s každým dalším cyklem.

Pokud budeme uvažovat úplné nabití a následné úplné vybití článku, potom můžeme říci, že pokud vybijeme článek dvakrát po sobě pouze na polovinu, bude se jednat o dva poloviční cykly, které s ohledem na životnost odpovídají jednomu úplnému cyklu. Pokud budeme články vybíjet pouze na polovinu jejich kapacity, maximální počet cyklů vzroste. Použijeme-li úplné cykly, můžeme říci, že čím vyšší bude hloubka vybití, tím menší počet cyklů můžeme baterii v rámci své životnosti poskytnout. [Hlavinka, 2011]



Obr. 16 Cyklus životnosti baterie [Elnika, 2010]

Graf zobrazuje závislost hloubky vybití na počtu vybíjecích cyklů. S rostoucí hloubkou vybití klesá počet vybíjecích cyklů. Pokud bychom chtěli dosáhnout křivky delší životnosti, použili bychom baterii s vyšší kapacitou. U naší zvolené baterie Winston TS-LFP100AHA je dána životnost pro 80 procentní hloubky vybití více než 3000 cyklů a pro 70 procentní hloubku vybití více než 5000 cyklů. Abychom mohli ověřit tyto hodnoty, je potřeba použít velmi podobný postup jako výrobce.

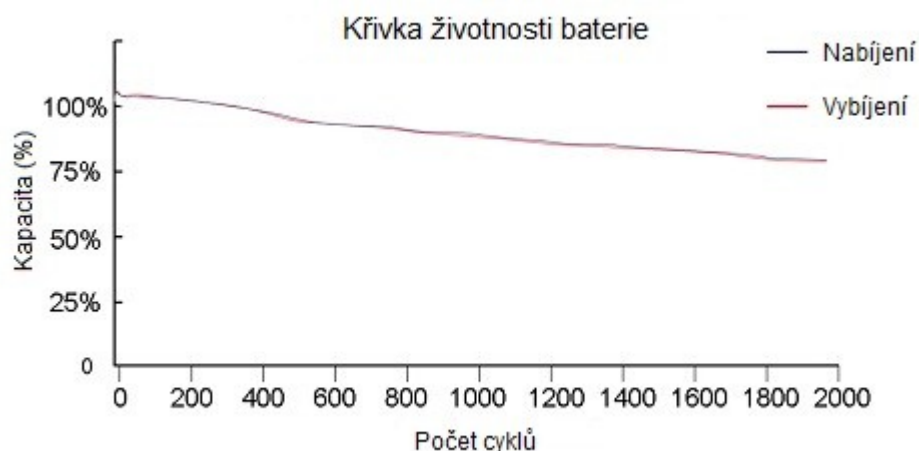
Test životnosti baterie

Výrobce uvádí podmínky, při kterých by se tento test měl provádět.

Podmínky: Tlak vzduchu: 86kPa – 106kPa
Teplota: 23°C±1°C

Postup:

1. Baterii nabíjíme konstantním proudem 33A dokud nedosáhneme napětí 4,25V, potom začneme nabíjet konstantním napětím 3,6V, dokud nabíjecí proud nebude menší než 1A.
2. Vybijeme baterii konstantním proudem 33A, dokud odebraná energie nedosáhne 80% aktuální kapacity. Napětí však nesmí klesnout pod povolenou mez 2,5V.
3. Stokrát opakujeme krok 1,2 dokud nebude baterie plně vybita, zapíšeme hodnoty dostupné kapacity.
4. Opakujeme kroky 1,2,3 a zapisujeme hodnoty pro opakování 100, 200, 300 nabíjecích cyklů atd. do té doby dokud dostupná kapacita není menší než 80% jmenovité kapacity.
5. Naměřené hodnoty pro opakovací cykly 100, 200, 300 atd. a hodnoty dostupné kapacity vykreslíme v grafu. Výsledkem bude křivka životnosti testované baterie.



Obr. 17 Příklad výsledného grafu životnosti baterie [Hipower, 2011]

6.2 Měření vnitřního odporu

Vnitřní odpor se udává v ohmech. Čím je hodnota vnitřního odporu menší, tím je akumulátor „tvrdší“. U ideálního akumulátoru se vnitřní odpor blíží nule a byl by schopen dodat jakýkoliv proud bez poklesu svorkového napětí. Ideální akumulátor však neexistuje.

U skutečného akumulátoru dochází vždy k poklesu napětí, což je způsobeno jeho vnitřním odporem. Čím vyšší proud budeme z obvodu odebírat, tím větší bude pokles napětí a vnitřní odpor poroste. Podle definice Ohmova zákona bude platit, čím bude vnitřní odpor nižší, tím bude protékající proud vyšší. Malý vnitřní odpor akumulátoru zajišťuje, při velkém zatížení, poskytnout vysoký vybíjecí proud, aniž by došlo ke značnému poklesu napětí v obvodu akumulátoru. Vnitřní odpor roste s úrovní vybití článku.

Pokud je potřeba stanovit pokles napětí na akumulátoru při jeho zatížení, je třeba změřit jeho vnitřní odpor. Pokud je k dispozici možnost srovnání vnitřního odporu měřeného akumulátoru s hodnotami nového akumulátoru, tak vnitřní odpor může sloužit i jako dobrý indikátor technického stavu akumulátoru. V praxi platí, že čím je akumulátor starší a čím více cyklů prodělal, tím se jeho vnitřní odpor zvětšuje.

Postup měření:

1. Vybijeme baterii konstantním proudem 0,2CA na minimální napětí baterie uváděné výrobcem, každý krok provádíme při dané teplotě.
2. Nabijeme baterii na maximální napětí dle výrobce.
3. Ponecháme baterii při dané teplotě po dobu 1 - 4 hod.
4. Proudem $I_1=0,2CA$ budeme baterii vybíjet po dobu 10 sekund a změříme vybíjecí napětí U_1 , po té zvýšíme vybíjecí proud na 1CA a ihned změříme napětí U_2 .
5. Sestavíme tabulku naměřených hodnot a vykreslíme výsledný graf.

Měření provádíme na kontaktech nezávislých od vedení proudu. Vnitřní stejnosměrný odpor R_{dc} vypočteme podle vztahu:

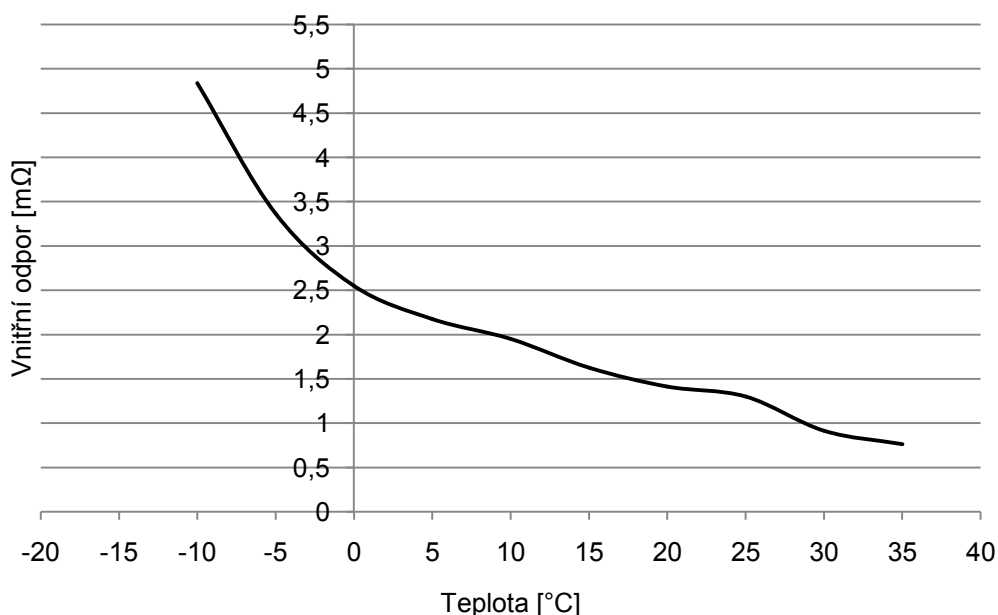
$$R_{dc} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} [\Omega; V, V, A, A] \quad (1)$$

Vybíjecí proudy I_1, I_2 jsou konstantní a napětí U_1, U_2 jsou napětí měřená při zatížení.

Tab. 4 Tabulka naměřených hodnot

Teplota [°C]	U_1 [V]	U_2 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	R_{dc} [mΩ]
35	3,312	3,251	20	100	0,7625
30	3,308	3,235	20	100	0,9125
25	3,292	3,188	20	100	1,3
20	3,235	3,122	20	100	1,4125
15	3,231	3,101	20	100	1,625
10	3,228	3,072	20	100	1,95
5	3,226	3,052	20	100	2,175
0	3,223	3,019	20	100	2,55
-5	3,174	2,905	20	100	3,3625
-10	2,945	2,558	20	100	4,8375

Při měření byly baterie ponechávány při dané teplotě po dobu 2h, což bylo časově dosti náročné. Původně mělo být měření prováděno v rozmezí teplot -20°C až 40°C. Bohužel k dispozici jsme měli pouze chladicí zařízení, které bylo schopno baterii ochladit na teplotu -10°C. Při této teplotě došlo k poklesu napětí článku pod minimální mez udávanou výrobcem. Z toho důvodu jsme měření při nižší teplotě zavrhlí, protože by mohlo dojít k poškození baterie. Z naměřených hodnot je patrné, že vnitřní odpor baterie s klesající teplotou roste. Klesá také napětí článku, což je způsobeno opakovaným vybíjením.

Graf závislosti vnitřního odporu baterie na teplotě

Obr. 18 Graf závislosti vnitřního odporu baterie na teplotě

Vnitřní odpor akumulátoru se mění i v závislosti na úrovni vybití akumulátoru, proto je dobré stanovit hodnoty vnitřního odporu několika změřenými vzorky, od plného nabití až do vybití akumulátoru. Tímto způsobem je možné sestavit křivku vnitřního odporu a ná-

sledně stanovit do jaké úrovně vybití je měřený akumulátor schopen dosáhnout požadovaných parametrů.

Vliv vysokých a nízkých teplot

Vysoké teploty urychlují veškeré chemické reakce probíhající v akumulátorech. Teplotu, při které dosahují akumulátory nejvyšší kapacity, udávají výrobci. Při vyšších teplotách mírně vzrůstá kapacita akumulátoru a snižuje se vnitřní odpor. Výrazně se zvyšuje vliv samovybití a zkracuje se životnost akumulátorů.

Nízké teploty naopak chemické reakce zpomalují a tím dochází k výraznějšímu snižování jejich kapacity. Změna kapacity v závislosti na teplotě ovlivňuje velikost vybíjecích proudů. Při nízkých teplotách vnitřní odpor roste a odběr vysokého proudu způsobuje výrazný pokles napětí. S klesající teplotou se snižuje schopnost plného nabití akumulátoru. [Cenek, 2003]

6.3 Měření kapacity baterie

Hlavním parametrem baterie je její kapacita. Podle velikosti kapacity baterie můžeme určit, v jakém stavu se baterie nachází a kolik dalších cyklů je schopna vydržet, než poklesne její kapacita na hodnotu, kdy ji bude třeba vyměnit za novou. S rostoucím počtem prodělaných cyklů nabíjení a vybíjení kapacita baterie klesá. Například nová 100Ah baterie může dosahovat někdy až hodnoty například 110Ah. Abychom mohli určit dostupnou kapacitu baterie, navrhli jsme tento test. Postup je podobný jako u měření vnitřního odporu.

Postup měření:

1. Vybijeme baterii konstantním proudem 0,2CA do minimální hodnoty napětí.
2. Baterii nabijeme proudem 0,2CA na maximální hodnotu napětí.
3. V tomto stavu baterii ponecháme 1 - 2 hod.
4. Začneme baterii vybíjet konstantním proudem 0,2CA a měříme dobu, za kterou klesne napětí článku na minimální hodnotu uváděnou výrobcem.

Kapacitu baterie vypočteme podle vztahu:

$$C_N = I_V \cdot t_V [Ah; A, h] \quad (2)$$

V tomto případě je vybíjecí proud I_V konstantní a měříme dobu vybíjení t_V .

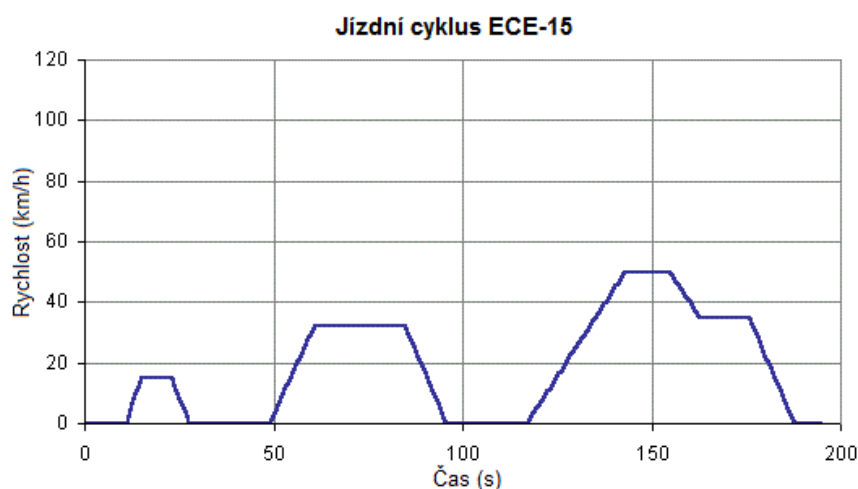
Tab. 5 Tabulka naměřených hodnot

U [V]	I _V [A]	t _V [h]	C _N [Ah]
3,34	20	4,8	96
3,32	20	4,71	94,2
3,23	20	4,54	90,8

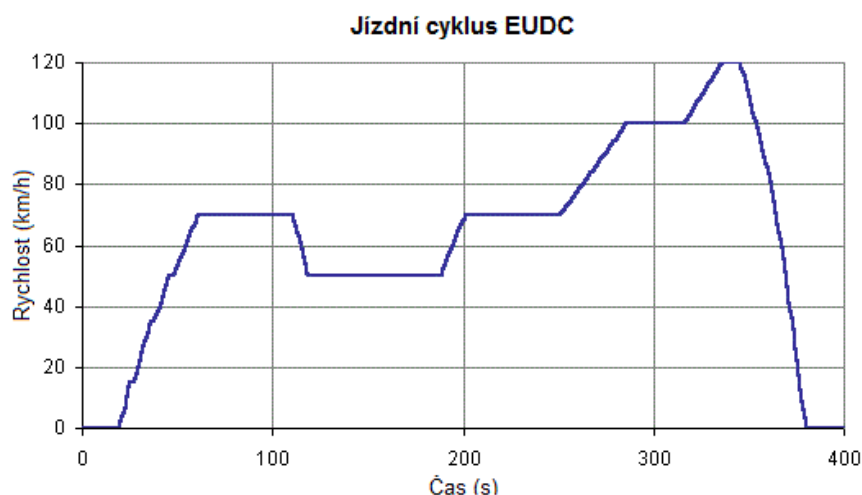
Pro tento test byly náhodně vybrány tři baterie. Všechny baterie jsme vybili a opět nabili konstantním proudem dle výše uvedeného postupu. V tabulce naměřených hodnot jsou uvedena maximální napětí, kterých bylo u jednotlivých baterií dosaženo. Už podle hodnoty napětí baterií můžeme určit, že už prodělaly několik stovek cyklů vybití a nabití. Každou baterii byla vybíjena konstantním proudem 20A a pomocí ovládacího softwaru byl změřen čas, po který se baterie vybíjely. Měření bylo vždy ukončeno, jakmile napětí baterie dosáhlo hodnoty 2,5V. Výsledný čas byl přepočten na hodiny a zapsán do tabulky. Výsledné kapacity byly dopočteny podle vztahu 2.

6.4 Zatížení baterie v běžném provozu

Tento test se zabývá zatížením baterií v městském provozu. K simulaci městského provozu využijeme takzvané jízdní cykly. Jízdní cyklus má standardizovaný tvar. Mezi evropské jízdní cykly patří ECE a EUDC. Tyto testy se používají pro emisní certifikaci vozidel. Měření probíhá na dynamometru. Celý cyklus je tvořen čtyřmi městskými cykly ECE-15, které se bez přerušení opakují, a následně jedním EUDC (Extra Urban Driving Cycle) cyklem. Cyklus ECE-15 známý také jako UDC (Urban Driving Cycle) simuluje typický městský provoz automobilu. Vyznačuje se nízkými rychlostmi a zatížením motoru. EUDC test je zaměřen na mimoměstský provoz. Je charakterizován vyššími rychlostmi, zrychlením a nedochází k častému zastavení vozidla. [GFEI, 2008]



Obr. 19 Jízdní cyklus ECE-15 [GFEI, 2008]



Obr. 20 Jízdní cyklus EUDC [GFEI, 2008]

Tab. 6 Parametry testů ECE-15 a EUDC [DieselNet, 2008]

Parametr	Jednotky	ECE-15	EUDC
Dráha	km	$4 \cdot 1,013 = 4,052$	6,955
Doba trvání	s	$4 \cdot 195 = 780$	400
Průměrná rychlost	km/h	18,7	62,6
Maximální rychlost	km/h	50	120

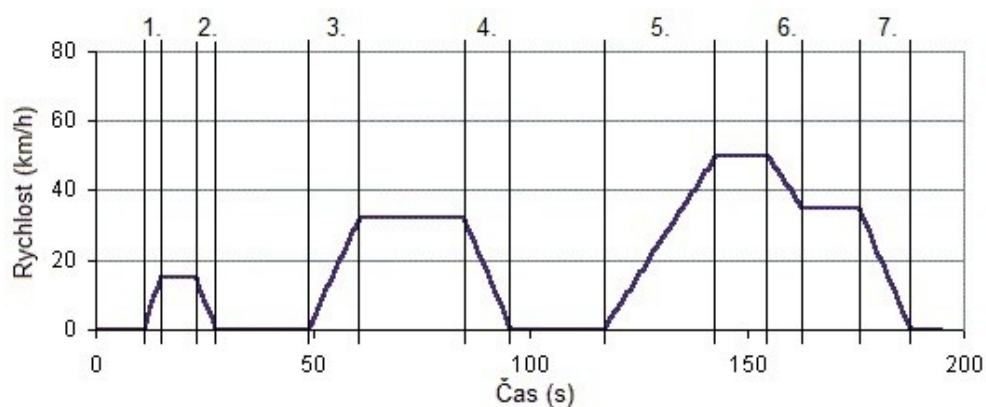
Návrh vlastního zatížení v městském provozu

Pro náš test použijeme graf na obr. 19. Tento pohyb je charakteristický svým konstantním zrychlením. Vozidlo se bude pohybovat rovnoměrně zrychleným pohybem. V případě zrychlování vozidla bude nutné dodávat elektromotoru vysoký proud. Při snižování rychlosti bude naopak docházet k takzvanému regeneračnímu dobíjení, které bude nabíjet akumulátor. Vliv pasivních odporů jako jsou valivý odpor pneumatik, aerodynamika, spotřeba elektrické energie spotřebičů vozidla tento test zanedbává.

Postup řešení:

1. Nejprve si v grafu vyznačíme úseky, ve kterých dochází ke zrychlení a zpomalení. S těmito úseky budeme pracovat. Například úsek číslo 5. zaměřili jsme se na zrychlování vozidla z rychlosti v_1 v čase t_1 na rychlost v_2 v čase t_2 . Z těchto hodnot určíme zrychlení vozidla.

$$a = \frac{(v_2 - v_1)}{(t_2 - t_1)} [m \cdot s^{-2}; m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-1}, s, s] \quad (3)$$



Obr. 21 Upravený graf cyklu ECE-15

2. Podle prvního Newtonova zákona určíme velikost síly, kterou se vozidlo pohybuje.

$$F = a \cdot m [N; m \cdot s^{-2}, kg] \quad (4)$$

3. Určíme vztah pro mechanickou práci.

$$W_M = F \cdot s [J; N, m] \quad (5)$$

4. Určíme vztah elektrickou práci.

$$W_E = U \cdot I \cdot (t_2 - t_1) [J; V, A, s, s] \quad (6)$$

5. Vycházíme z předpokladu, že mechanická práce se rovná práci elektrické.

$$F \cdot s = U \cdot I \cdot (t_2 - t_1) \quad (7)$$

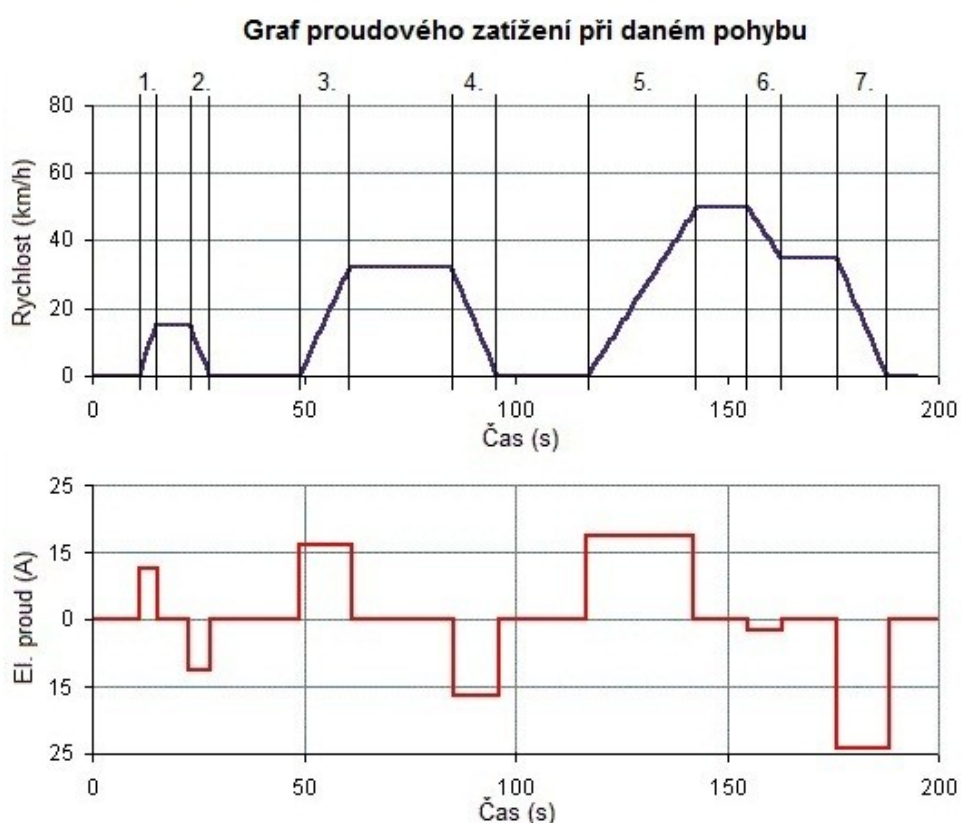
Z rovnice si vyjádříme elektrický proud.

$$I = \frac{F \cdot s}{U \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{F \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot (t_2 - t_1)^2}{U \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{F \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot (t_2 - t_1)}{U} [A; N, m \cdot s^{-2}, s, s, V] \quad (8)$$

Z grafu na obr. 20 byly pro jednotlivé úseky odečteny jejich parametry a následně zapísány do tabulky. Zbývající hodnoty byly vypočítány podle uvedeného postupu. Pro vykreslení grafu závislosti elektrického proudu na čase byl použit elektromobil Nissan Leaf s parametry: hmotnost $m=1525$ kg, celkové napětí baterie $U=345$ V.

Tab. 7 Tabulka vypočtených hodnot

Úsek	t_1 [s]	t_2 [s]	$v_1 [m \cdot s^{-1}]$	$v_2 [m \cdot s^{-1}]$	$a [m \cdot s^{-2}]$	s [m]	F [N]	I [A]
1.	10	13,5	0	17	1,35	8,26	2057,54	13,31
2.	25	28,5	17	0	-1,35	-8,26	-2057,54	13,31
3.	49	60	0	33	0,83	50,42	1270,83	15,96
4.	83	94	33	0	-0,83	-50,42	-1270,83	15,96
5.	116	140	0	50	0,58	166,67	882,52	16,79
6.	155	161	50	38	-0,56	-10,00	-847,22	3,87
7.	175	185	38	0	-1,06	-52,78	-1609,72	23,28



Obr. 22 Proudové zatížení baterie při jízdním cyklu ECE-15

V případě použití uvedeného pohybu dochází k zatížení baterie pouze proudem desítek ampér. Je to způsobeno malým zrychlením elektromobilu. Pokud by bylo zrychlení elektromobilu vyšší, došlo by k růstu proudu řádově až ke stovkám ampér. Dalším parametrem, který by měl vliv na průběh proudu je účinnost elektromotoru.

ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se zabýval testováním baterií použitelných pro provoz elektromobilů. Začátek práce se zabývá popisem funkce elektromobilu, jeho účinností a výhodami. V další části jsou uvedeny základní pojmy a veličiny používané v oblasti akumulátorů. Zmínil jsem se o nejčastěji používaných typech bateriích a popsal jejich principy, výhody a nevýhody.

Další kapitola se zabývá výběrem baterií. Po zhodnocení vlastností baterií v předešlé kapitole bylo přistoupeno k výběru nejvhodnějšího typu článku. Byly použity tři baterie od různých výrobců. Popsal jsem jejich vlastnosti a charakteristiky dodávané výrobcem. Zhodnotil jsem jejich výhody a nevýhody vůči konkurenci. Provedl jsem základní popis měřicího pracoviště a uvedl jeho blokové schéma. Dále jsem ve zkratce představil možnosti nastavení softwaru, kterým je celé měřicí pracoviště ovládáno. Jelikož jsem měl k dispozici pouze baterie od jednoho výrobce, všechna měření byla prováděna na těchto bateriích.

Nejdůležitější kapitolou je praktická část práce. Jedná o rozборы měření, kterými bychom měli jednotlivé baterie otestovat. Testy byly navrženy univerzálně, což umožňuje použitelnost pro všechny uvedené baterie. Nejprve se zmiňuji o testu životnosti baterie. Pomocí toho testu, bychom měli být schopni ověřit životnost baterie udávanou výrobcem. Návrh testu jsem zpracoval na základě reálných testů výrobce, a proto bychom měli být v případě realizace schopni dosáhnout přibližně stejného počtu cyklů. Další test se zabývá měřením vnitřního odporu v závislosti na teplotě. U tohoto testu jsem vycházel z normy pro měření vnitřního odporu. Uvedl jsem postup, podle kterého jsem test realizoval. Realizace tohoto testu byla časově velice náročná. Sestavil jsem tabulku naměřených hodnot pro rozmezí teplot -10°C až 35°C a vykreslil výsledný graf. Velikost vnitřního odporu baterie s rostoucí teplotou klesala, což jsme také předpokládali. Problémem tohoto testu byla časově náročná realizace. Důvodem bylo vybíjení a nabíjení baterie nízkým proudem a také nutnost ponechávat baterii při dané teplotě po určitou dobu. Měřil jsem také aktuální kapacitu baterie. U tohoto měření jsem baterii vybíjel konstantním proudem a měřil čas, po který se baterie vybíjela až do minimální hodnoty napětí. Podle uvedeného vzorce jsem spočítal kapacitu baterie. Výsledná doba vybíjení jednotlivých baterií se výrazně nelišila a pokles kapacity se pohyboval mezi 4-9 procenty jmenovité kapacity. Poslední test se zabýval zatížením baterie v městském provozu. Jako příklad pohybu vozidla v provozu jsem použil graf emisního jízdního cyklu. Tento pohyb je charakteristický svým konstantním zrychlením, což ulehčilo dílčí výpočty. Při návrhu testu jsem vycházel ze základních fyzikálních vzorců pro zrychlení, sílu, mechanickou a elektrickou práci. Pro výpočet jsem použil parametry elektromobilu Nissan Leaf, avšak nezahrnul jsem zde ztráty vzniklé pasivními odpory.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Cenek M., *Akumulátory od principu k praxi*. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. ISBN 80-86534-03-0.

Hammerbauer J., *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity, 1998, 2. vyd., 181 s. ISBN 80-7082-411-5, Dostupné z: http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/enz/ENZ_Elektronicke%20a%20napajeci%20zdroje%20a%20akumulatory,%20J.Hammerbauer.pdf

Bateria: *Ni-Cd akumulátor*, [online]. 2. 9. 2008 [cit. 2011-10-5] Dostupné z: <http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--poucenii/jak-to-funguje-/niklkadmiovy-akumulator-nicd.htm>

DieselNet: *Emission Test Cycles*, [online]. 4.8.2001 [cit. 2011-08-12] Dostupné z: http://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php

Dow kokam: *Baterie SLPB70460330*, [online]. 14. 12. 2010 [cit. 2012-03-25] Dostupné z: http://www.dowkokam.com/resources/SpecSheet_100Ah.pdf

Calb: *LiFePO₄ cell 100AHA*, [online]. 5. 7. 2009 [cit. 2012-03-25] Dostupné z: <http://en.calb.cn/Product/?id-115.html>

Electroauto: *Elektromobily Toyota*, [online]. 13. 8. 2005 [cit. 2011-10-6] Dostupné z: <http://www.electroauto.cz/elcars1.html>

Elnika: *VRLA (AGM) baterie*, [online]. 2. 11. 2010 [cit. 2012-13-12] Dostupné z: <http://www.elnika.cz/elnika.php?p=cze/akumulatory-specifikace>

Evtalk: *New Electric Smart Car on the way*, [online]. 27. 9. 2010 [cit. 2012-01-10] Dostupné z: <http://www.evtalk.org/255/new-electric-smart-car-on-the-way/>

Global fuel economy initiative: *European Test Cycles*, [online]. 4. 6. 2008 [cit. 2011-08-12] Dostupné z: http://www.unep.org/transport/gfei/autotool/approaches/information/test_cycles.asp

Hipower: *Performance test LiFePO₄ battery*, [online]. 18. 1. 2011 [cit. 2011-10-22] Dostupné z: <http://www.hipowergroup.com/2010/1019/1.html>

Hipower: *Baterie HP-PW-100AH*, [online]. 1. 5. 2010 [cit. 2012-04-10] Dostupné z:
<http://www.scribd.com/doc/45078745/Specification-of-100Ah-Single-Cells>

Hlavinka S., *Nabíjecí články a baterie*, [online]. 30. 4. 2011 [cit. 2011-10-11] Dostupné z:
<http://skyfly.cz/pristroj/baterky02.htm>

Kincl Z., *Akumulátory v praxi*, [online]. 28. 4. 2009 [cit. 2011-12-23] Dostupné z:
<http://www.prcek.ic.cz/stranky/index.php?id=15>

Krátký F., *Baterie v elektromobilech*, [online]. 22. 6. 2010 [cit. 2011-10-12] Dostupné z:
elektromobil.vseznamu.cz/baterie-v-elektromobilech

Vegr J., *Elektromobily - historie a současnost*, [online]. 1. 3. 2008 [cit. 2012-01-20] Dostupné z: <http://www.pro-energy.cz/clanky7/3.pdf>

Winston: *Baterie TS-LFP100AHA*, [online]. 1. 1. 2007 [cit. 2011-11-20] Dostupné z:
<http://www.everspring.net/TS-LFP100AHA.pdf>

Juránek M., [cit. 2011-10-12] - osobní konzultace

Čech R., [cit. 2011-10-24] - osobní konzultace